

Ю.В. БАТЫГИН, А.Ю. БОНДАРЕНКО, Е.Ф. ЕРЕМИНА, С.А. ШИНДЕРУК, Г.С. СЕРИКОВ

НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Целью настоящего рассмотрения является получение расчетных соотношений для характеристик электромагнитного процесса при непосредственном возбуждении последовательного резонансного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения с частотой следования, равной собственной частоте контура. Данный вопрос возникает в технике больших токов и сильных магнитных полей, где требуется достаточно строгая настройка аппаратуры на фиксированные рабочие частоты. Кроме того, резонанс напряжений представляет практический интерес, например, для питания повышенным напряжением высокоомных нагрузок, для создания устройств индукционного нагрева. В настоящей работе решением задачи о переходном процессе найдены временные формы возбуждаемого тока. Следует особо подчеркнуть, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонического тока и напряжения при ангармоническом резонансном возбуждении активно-реактивного контура с фиксированной собственной частотой. Научная новизна состоит в получении расчетных соотношений для характеристик процесса в переходном режиме, когда ангармонический источник напряжения непосредственно подключается к резонансному электрическому контуру. Важность решаемой задачи обусловлена практическими проблемами в разработках электротехнических устройств, где действенность соответствующих элементных составляющих практически возможна только в условиях, с достаточной степенью близких к резонансным. Практическая значимость: полученные выражения для токов, возбуждаемых при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному активно-реактивному контуру, необходимы для дальнейшего анализа протекающих процессов при проектировании электротехнических устройств с резонансными компонентами. Пути дальнейших исследований: весьма перспективным в направлении дальнейших исследований видится анализ протекающих процессов при непосредственном возбуждении резонанса напряжений в последовательном активно-реактивном контуре серий ангармонических сигналов.

Ключевые слова: резонанс напряжений, активно-реактивный контур, ангармонический сигнал, прямоугольный импульс напряжения, переходный режим, амплитудно-временная зависимость.

Ю.В. БАТИГІН, О.Ю. БОНДАРЕНКО, О.Ф. ЄРЬОМІНА, С.О. ШИНДЕРУК, Г.С. СЕРІКОВ

БЕЗПОСЕРЕДНЄ ЗБУДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРУ ПРЯМОКУТНІМИ ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ. РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Метою цього розгляду є отримання розрахункових співвідношень для характеристик електромагнітного процесу при безпосередньому збудженні послідовного резонансного активно-реактивного контуру періодичними серіями з прямокутних уніполярних або осцилюючих імпульсів напруги з частотою проходження, що дорівнює власній частоті контуру. Дане питання виникає в техніці великих струмів і сильних магнітних полів, де потрібна досить точна настройка апаратури на фіксовані робочі частоти. Крім того, резонанс напруг становить практичний інтерес, наприклад, для живлення підвищеною напругою високоомних навантажень, для створення пристроїв індукційного нагріву. В даній роботі рішенням завдання про перехідний процес знайдені часові форми струму, що збуджується. Слід особливо підкреслити, що постановка задачі, яка приймається, дозволяє сконцентруватися на проблемі формування квазигармонічних струму і напруги при ангармонічному резонансному збудженні активно-реактивного контуру з фіксованою власною частотою. Наукова новизна полягає в отриманні розрахункових співвідношень для характеристик процесу в перехідному режимі при безпосередньому підключенні до резонансного електричного контуру ангармонічного джерела напруги. Значимість задачі, що розв'язується, обумовлена практичними завданнями в розробках електротехнічних пристроїв, де дієвість відповідних елементних складових практично можлива лише в умовах, з достатнім ступенем близьких до резонансних. Отримані вирази для струмів, що збуджуються при безпосередньому підключенні джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного активно-реактивного контуру, необхідні для подальшого аналізу процесів, що протікають при проектуванні електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами. Шляхи подальших досліджень: вельми перспективним в напрямку подальших досліджень є аналіз процесів, що протікають при безпосередньому збудженні резонансу напруг у послідовному активно-реактивному контурі серією ангармонічних сигналів.

Ключові слова: резонанс напруг, активно-реактивный контур, ангармонічний сигнал, прямокутний імпульс напруги, перехідний режим, амплітудно-часова залежність.

YU.V. BATYGIN, A.YU. BONDARENKO, O.F. YERYOMINA, S.A. SHINDERUK, G.S. SERIKOV

DIRECT EXCITATION OF A SEQUENTIAL RESONANT CIRCUIT BY RECTANGULAR PULSE VOLTAGE. CALCULATED RELATIONS

The purpose of this consideration is to obtain ratios for the electromagnetic process characteristics with the direct excitation of a series resonant active-reactive circuit with periodic series of rectangular unipolar or oscillating voltage pulses with a repetition frequency equal to the natural frequency of the circuit. This question arises in the technique of high currents and strong magnetic fields, where a

fairly strict adjustment of the equipment to fixed operating frequencies is required. In addition, the voltage resonance is of practical interest, for example, to supply high-voltage loads, to create induction-heating devices. In this work, the transient process has found temporary forms of the excited current. It should be especially emphasized that the problem formulation taken in this way makes it possible to concentrate on the problem of the formation of quasi-harmonic current and voltage during anharmonic resonant excitation of an active-reactive circuit with a fixed natural frequency. The scientific novelty consists in obtaining the calculated ratios for the characteristics of the process in a transient mode with direct connection to the resonant electric circuit of the anharmonic voltage source. The significance of the problem to be solved is due to practical problems in the development of electrical devices, where the effectiveness of the corresponding elemental components is practically possible only in conditions with a sufficient degree close to resonance. Practical significance: the obtained expressions for the currents excited by the direct connection of the anharmonic voltage source to the series resonant active-reactive circuit are necessary for further analysis of the processes taking place in the design of electrical devices with resonant components. Ways to further research: the analysis of the processes taking place with the direct excitation of a voltage resonance in a sequential active-reactive circuit by a sequence of anharmonic signals is very promising in the direction of further research.

Keywords: voltage resonance, active-reactive circuit, anharmonic signal, rectangular voltage pulse, transient mode, amplitude-time dependence.

Актуальность работы. Резонанс, как явление природы во всех ее проявлениях, имеет позитивное и негативное значение. Если говорить о негативе, то наиболее ярким примером можно назвать событие 1905 года в Петербурге, где после перехода кавалерийского эскадрона обрушился Египетский мост через реку Фонтанку. Причина заключалась в том, что церемониальный марш дрессированных лошадей попал в резонанс с периодом собственных колебаний мостовых опор. В результате напряженное состояние превысило заложенный запас прочности, и мост рухнул [1]. Таких описаний с вредными последствиями резонанса в истории техники можно найти достаточно много. Наряду с этим есть также и многочисленные примеры использования резонанса как полезного явления, в частности, для создания различных электротехнических устройств.

Краткий обзор литературы. В технике больших токов и сильных магнитных полей явление резонанса позволяет настраивать аппаратуру на заданные частоты, что обеспечивает ее работу с максимальной эффективностью [2,3]. Как известно, существует два вида электрических резонансов – это «резонанс токов» и «резонанс напряжений». Последний представляет практический интерес, например, для питания повышенным напряжением высокоомной нагрузки, для создания эффективных устройств индукционного нагрева и др. [4-10].

Если остановиться на резонансе напряжений, то его сущность можно представить следующим образом. В контуре с последовательным соединением резистора, электрического конденсатора и соленоида (последовательный активно-реактивный контур) при возбуждении синусоидального сигнала определенной частоты будет иметь место нулевое реактивное сопротивление. Физически данный факт объясняется резонансом, суть которого состоит в том, что при протекании тока происходит переход магнитной энергии соленоида в электрическую энергию конденсатора и наоборот. Следует подчеркнуть, что этот эффект проявляется только для синусоидального сигнала в установившемся режиме на определенной частоте, величина которой тесно связана с параметрами контура [4,12].

Отмеченные выше условия резонанса напряже-

ний требуют исследований его возникновения в практически интересных случаях, когда последовательный активно-реактивный контур возбуждается ангармоническими сигналами, спектр которых наряду с основной частотой колебаний содержит, так называемые, высшие гармоники с частотами, кратными основному типу колебаний [11,12].

Целью настоящего рассмотрения является анализ процесса при непосредственном резонансном возбуждении последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Научная новизна состоит в получении расчетных соотношений для характеристик процесса в переходном режиме, когда ангармонический источник напряжения непосредственно подключается к резонансному электрическому контуру. Значимость решаемой задачи обусловлена практическими задачами в разработках электротехнических устройств, где действенность соответствующих элементных составляющих практически возможна только в условиях, с достаточной степенью близких к резонансным.

Материал и результаты исследований. Схема замещения исследуемого последовательного активно-реактивного контура и временные формы возбуждающего напряжения представлены на рис. 1. На схеме R , L , C – элементы контура, $E(t)$ – источник напряжения с внутренним сопротивлением R_0 .

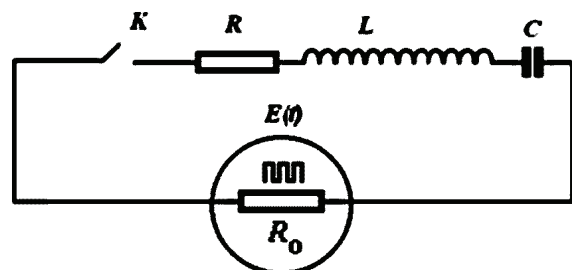


Рис. 1. Схема замещения последовательного резонансного контура

Принимаемые допущения: сопротивление соединительных проводов и проводов обмотки индуктивности R_1 , а также внутреннее сопротивление источника

напряжения R_0 достаточно малы, так что их сумма много меньше реактивных сопротивлений контура,

$$(R_0 + R_1) \ll \omega_0 L \text{ и } (R_0 + R_1) \ll \frac{1}{\omega_0 C},$$

где ω_0 – собственная частота;

L – индуктивность;

C – емкость.

Источник питания генерирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой E_m и частотой следования $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ (T – период), равной собственной частоте контура ω_0 , так что $\omega_0 = \omega_1$.

Амплитудно-временные формы возбуждающих сигналов $E(t)$ – осциллирующие или унipoлярные прямоугольные импульсы с длительностью, равной половине периода их следования (рис. 2 а, б).

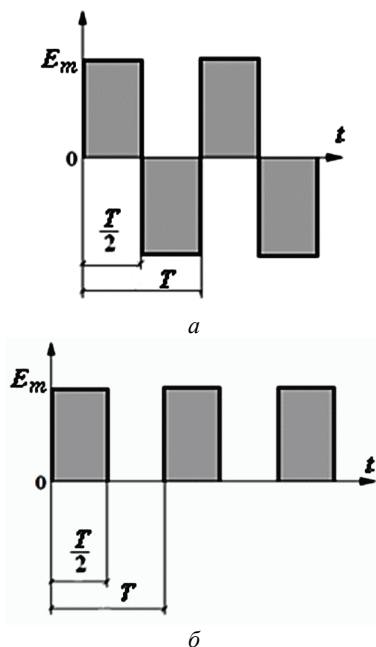


Рис. 2. Временные формы возбуждающих импульсов напряжения: а – осциллирующие; б – унipoлярные прямоугольные импульсы

Особо подчеркнем, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонических тока и напряжения при резонансном возбуждении активно-реактивного контура ангармоническими сигналами.

Расчетные соотношения. При решении поставленной задачи воспользуемся операторным методом расчета электрических цепей [4,11].

Дифференциальное уравнение относительно напряжения на емкости $U_C(t)$ в пространстве изображений по Лапласу при нулевых начальных условиях $\left\{ U_C(0) = \frac{dU_C(0)}{dt} = 0 \right\}$ имеет вид [11,12]:

$$p^2 U_C(p) + 2\delta \cdot p U_C(p) + \omega_0^2 \cdot U_C(p) = \omega_0^2 \cdot E(p), \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа;

$$U_C(p) = L\{U_C(t)\}; E(p) = L\{E(t)\};$$

$$\delta = \frac{L}{2(R_0 + R_1)} - \text{декремент затухания};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{собственная частота контура}.$$

Решение уравнения (1) позволяет найти L -изображение возбуждаемого тока [13].

$$I(p) = C \cdot p U_C(p) = \frac{1}{L} \cdot F(p) \cdot E(p), \quad (2)$$

$$\text{где } F(p) = \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} - \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \cdot \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2};$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

Оригинал выражения (2) запишется как свертка функций [8].

$$I(t) = \frac{1}{L} \cdot F(t) * E(t), \quad (3)$$

где $F(t) \leftrightarrow F(p)$; $E(t) \leftrightarrow E(p)$ – оригиналы сомножителей в формуле (2).

Согласно постановке задачи, диссипация энергии минимальна, что означает достаточную малость величины относительного декремента затухания $\left(\delta_0 = \frac{\delta}{\omega} \ll 1 \right)$ и равенство частоты возбуждаемого сигнала собственной частоте исследуемого резонансного контура $\left(\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$. В этом случае выражение для $F(p)$ в выражении (2) можно упростить. После перехода в пространство оригиналов [12] получаем следующую зависимость

$$F(p) \approx \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega_0^2} \leftrightarrow F(t) = e^{-\delta t} \cos(\omega_0 \cdot t). \quad (4)$$

Свертка функций в выражении (3) с учетом (4) при введении фазовой зависимости вместо временной [12] в развернутом виде принимает вид:

$$I(\varphi) = \frac{1}{(\omega_0 \cdot L)} \cdot \int_0^\varphi e^{-\delta_0(\varphi-x)} \cdot \cos(\varphi-x) \cdot E(x) dx, \quad (5)$$

где $\varphi = \omega_0 t$ – фаза,

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega_0} - \text{относительный декремент затухания}.$$

Амплитудно-временную зависимость возбуждающего напряжения из последовательности осциллирующих прямоугольных импульсов (рис. 2, а) мож-

но представить разложением Фурье по синусам кратных дуг [12]:

$$E(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin(\omega_n \cdot \varphi), \quad (6)$$

где $E_n = \frac{2}{\pi} E_m \cdot \frac{[(-1)^n - 1]}{n^2 - 1}$ и $\omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n\right)}{\omega_0}$ – амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Ряд (6) поставим под знак интеграла в выражении (5). Учтем малость относительного декремента затухания. Полученный результат преобразуем, полагая, что собственная частота контура совпадает с частотой первой гармоники разложения (6). После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем амплитудно-временную зависимость для тока, возбуждаемого в режиме резонанса напряжений всеми гармониками входного сигнала.

Согласно определению и формуле (5), находим, что

$$I_{\text{sum}}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{1}{Q} \cdot G_1(t) \right), \quad (7)$$

где $Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{(R_0 + R)}$ – добротность контура,

$$G_1(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n - 1}{n^2 - 1} \right) \cos(n(\omega_0 t)).$$

Аналогично предыдущему получим амплитудно-временную зависимость для тока при резонансном возбуждении RLC – контура периодической последовательностью униполярных прямоугольных импульсов напряжения длительностью, равной половине периода повторения (рис. 2, б).

Соответствующую фазовую (амплитудно-временную) зависимость представим разложением Фурье по косинусам кратных дуг [8]:

$$E(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \cos\left(\omega_n \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right), \quad (8)$$

где $E_n = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n}$ и $\omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n\right)}{\omega_0}$ – амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Вычислим интеграл в выражении (5) с подстановкой разложения (8).

Пренебрегая бесконечно малыми слагаемыми порядка $\sim \delta_0$, после введения резонансных условий для первой гармоники входного сигнала получаем выражение для возбуждаемого тока с учетом всех гармонических составляющих спектра.

$$I_{\text{sum}}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{1}{Q} \cdot G_2(t) \right), \quad (9)$$

$$\text{где } G_2(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \cdot \cos\left(n \cdot \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)\right).$$

Полученные выражения для токов являются решениями поставленной задачи и могут служить основой для дальнейшего теоретического анализа процессов в последовательном резонансном активно-реактивном контуре при его возбуждении прямоугольными импульсами напряжения.

Выводы. Получены базовые аналитические выражения для характеристик электромагнитных процессов при непосредственном резонансном возбуждении последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Дальнейшими перспективами являются теоретические исследования, анализ и численные оценки с последующим переходом к экспериментам для обоснования практической дееспособности способов возбуждения резонансных контуров ангармоническими сигналами.

Список литературы

1. Почему обрушился Египетский мост в Санкт-Петербурге? (Катастрофа на Египетском мосту). Материалы сайта. 2017. Режим доступа: <http://petrogazeta.ru/history/246>
2. Резонансный усилитель мощности тока промышленной частоты. Материалы сайта. 2010. Режим доступа: <http://allpowr.ru/ru/33>
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука, 2004. 705 с.
4. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей: Учебник для ВУЗов / под ред. Бакалова В.П. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Горячая линия, Телеком, 2007. 597 с.
5. Барбашова М.В., Сабокар О.С., Сябрук А.С. Анализ электромагнитных процессов нагрева немагнитных металлов полем плоского кругового соленоида. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Харків: ХНАДУ. 2015. № 8. С. 176-181.
6. Волонцевич Д.О., Барбашова М.В., Радченко Е.С. Расчет полей в комбинированных индукторных системах – инструментах рихтовки металлических покрытий автомобилей кузовов. Харків: Електротехніка і електромеханіка. 2015. № 3. С. 55-58.
7. Гнатов А.В., Шиндерук С.А., Сабокар О.С., Худир Х., Тесленко Д.С. Анализ индуцированных токов при индукционном нагреве плоским прямоугольным многовитковым соленоидом. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Харків: ХНАДУ. 2015. № 8. С. 213-217.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage. Електротехніка і електромеханіка. 2016. № 1. С. 35–37.
9. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Сабокар О.С. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: математичне моделювання в техніці та технологіях. 2017. № 30 (1252). С. 21-27.

10. Batygin Yu.V., Shinderuk S.A., Serikov G.S., The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. Danish Scientific Journal. 2018. № 11-1. P. 72-79.

11. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник. 3-е изд. СПб: Лань. 2009. 432 с.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва: Наука, 1973. 832 с.

References (transliterated)

1. Pochemu obrushilsya Yegipetskiy most v Sankt-Peterburge? (Katastrofa na Yegipetskom mostu) [Why did the Egyptian bridge collapse in St. Petersburg? (The crash on the Egyptian bridge)] Site materials. 2017. Access mode <http://petrogazeta.ru/history/246>

2. Rezonansnyy usilitel' moshchnosti toka promyshlennoy chastoty. [Resonant power amplifier current power frequency]. Site materials. 2010. Access mode: <http://allpowr.su/ru/33>

3. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed power and electronics]. Moscow: Nauka. 2004. 705 p.

4. Bakalov V.P., Dmitriyev V.F., Kruk B.I. Osnovy teorii tsepey: [Fundamentals of the theory of chains] Uchebnyy dlya VUZov / pod red. Bakalova V.P. 3-ye izd., pererab. i dop. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2007. 597 p.

5. Barbashova M.V., Sabokar O.S., Syabruk A.S. Analiz elektromagnitnykh protsessov nagreva nemagnitnykh metallov polem ploskogo krugovogo solenoida. [Analysis of the electromagnetic processes of heating of non-magnetic metals by the field of a flat circular solenoid]. Avtomobil' i yelektronika. Suchasni tekhnologii [Car and electronics. Modern technologies.]. Kharkiv: KHNADU. 2015. № 8. P. 176-181.

6. Volontsevich D.O., Barbashova M.V., Radchenko Ye.S. Raschet poley v kombinirovannykh induktornykh sistemakh - instrumentakh rikhtovki metallicheskiy pokrytiy avtomobil'nykh kuzovov [Calculation of fields in the combined inductor systems - tools for the straightening of metallic coatings of automobile bodies]. Kharkiv: Electrical engineering & electromechanics. 2015. № 3. P. 55-58.

7. Gnatov A.V., Shinderuk S.A., Sabokar' O.S., Khudir K.H., Teslenko D.S. Analiz indutsirovannykh tokov pri induktsionnom nagreve ploskimt pryamougol'nym mnogovitykovym solenoidom. [Analysis of induced currents during induction heating with a flat-rectangular multi-turn solenoid] Avtomobil' i yelektronika. Suchasni tekhnologii. Kharkiv: KHNADU. 2015. № 8. P. 213-217.

8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimatsiya limitov vozmozhnosti stepennogo zaryadnogo sistema dlya kapacitivnoy energiyi. [Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage]. Electrical engineering & electromechanics. 2016. № 1. P. 35-37.

9. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Sabokar' O.S. Rezonans vo vtorichnom konture transformatora Tesla pri vzbuzhdenii garmonicheskimi napryazheniyami [Resonance in the secondary circuit of the Tesla transformer when excitation by the harmonic voltage]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. 2017. № 30 (1252). P. 21-27.

10. Batygin Yu.V., Shinderuk S.A., Serikov G.S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. Danish Scientific Journal. 2018. № 11-1. P. 72-79.

11. Atabekov G.I. Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]. Uchebnyy. 3-ye izd. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2009. 432 p.

12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov) [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

Поступила (received) 23.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Батигін Юрій Вікторович (Батыгин Юрий Викторович, Batygin Yuriy Victorovich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Бондаренко Олександр Юрійович (Бондаренко Александр Юрьевич, Bondarenko Olexandr Yuriyovich) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри інженерної електрофізики, тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Єрьоміна Олена Федорівна (Еремина Елена Федоровна, Yeryomina Olena Fedorivna) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com

Шиндерук Світлана Олександрівна (Шиндерук Светлана Александровна, Shinderuk Svitlana Olexandrivna) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Серіков Георгій Сергійович (Сериков Георгий Сергеевич, George Sergeevich Serikov) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-1211>; e-mail: georgy301212@gmail.com.